

平板式不锈钢-氨环路热管的实验研究

陈彬彬 刘志春 刘伟 杨金国 汪冬冬

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 为解决高热流密度电子器件的散热问题,设计了一套平板式不锈钢-氨环路热管(LHP)。研究表明,该平板式LHP能够在热负荷2.5~130 W顺利启动运行,无明显温度波动现象发生。当蒸发器壁面温度低于60°C时,LHP能够传输的最大热负荷为130 W,热流密度12.8 W/cm²。LHP能在热负荷10~130 W范围内进行变热负荷运行,具有较强的自调节能力。LHP热阻整体上随着热负荷的增加而减小。但是当热负荷高于100 W时,LHP热阻随着热负荷的增加略有上升。

关键词 环路热管;平板式蒸发器;双孔径毛细芯;电子器件冷却;热流密度
中图分类号: TK124 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2012)10-1751-04

Experimental Investigation on Stainless-Steel-Ammonia Loop Heat Pipe With Flat Evaporator

CHEN Bin-Bin LIU Zhi-Chun LIU Wei YANG Jin-Guo WANG Dong-Dong

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract A stainless-steel-ammonia loop heat pipe (LHP) with flat evaporator was developed to solve the heat dissipation of electronic device with high heat flux. The obtained results indicated that the LHP could start up successfully at heat load in the range from 2.5 to 130 W without obvious temperature oscillation. When the evaporator temperature is below 60°C, the maximum heat load the LHP could transfer reaches 130 W, which corresponds to a heat flux of 12.8 W/cm². The LHP has high capacity of adjusting to heat load change while it could operate with variable heat load changing between 10 and 130 W. The total thermal resistance generally decreases with increasing heat load, but it has a slight increase when heat load is greater than 100 W.

Key words loop heat pipe; flat evaporator; biporous wick; electronic cooling; heat flux

0 引言

随着电子器件向着高功率化和微型化发展,电子器件的散热问题变得十分严峻。由于单相散热技术散热能力的限制,两相散热技术引起了众多研究者的关注。环路热管(Loop Heat Pipe, LHP)是一种利用工质的汽化和冷凝两相循环来传递热量的新型高效装置,在航天热控和高热流电子器件散热领域有很广泛的应用前景。

与圆柱式蒸发器相比,平板式蒸发器可以更好地贴合发热元件,增大有效接触面积,降低LHP的传热热阻^[1]。文献[2]~[6]针对平板式LHP,完成不同蒸发器设计、毛细芯结构、充灌率、重力倾角以及工质的实验测试,研究其启动特性、变热负荷运行特性以及控温性能等。本文设计了一种不锈钢-氨平板式LHP,改进蒸发器结构,降低蒸发器向补偿腔的漏热,研究

其启动、稳态和变工况运行等传热特性。

1 实验设计

平板式环路热管由蒸发器、冷凝器、补偿腔、蒸气管路和液体管路组成,如图1所示。蒸发器是LHP设计中最关键的一个部件,本实验所设计的蒸发器结构如图2所示。补偿腔和蒸发器耦合在一起,通过毛细芯连接。整个蒸发器有效受热面直径为36 mm,在保证蒸发器整体强度的前提下,壁厚都设计成1.5 mm,减小侧壁导热效应。补偿腔内的液体通过毛细芯进入到蒸发器内,补充工质汽化所需量。蒸气腔的作用是保证蒸气连续的进入到蒸气管路,降低LHP发生温度波动的可能性。毛细芯制作采用镍粉和造孔剂混合冷压成型技术,烧结成双孔径芯体,其孔隙

收稿日期: 2011-12-12; 修订日期: 2012-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.50876035; No.50906026)

作者简介: 陈彬彬(1986-),男,博士研究生,主要从事电子器件散热和热控技术研究。

率可达到 69%。冷凝器设计成套管式,冷媒温度最低可达 -15°C 。实验工质为氨,其纯度达到 99.995%。

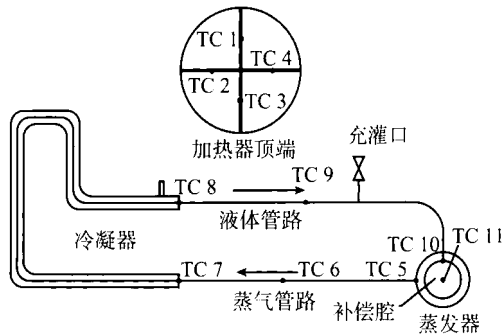


图 1 LHP 系统图和热电偶布置位置

Fig. 1 The schematic of LHP and locations of the thermocouples

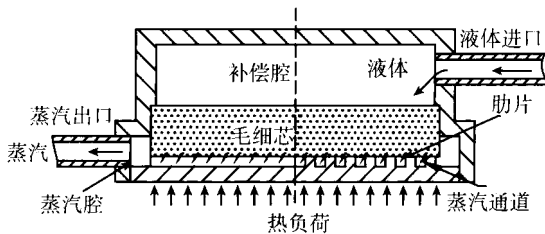


图 2 蒸发器结构

Fig. 2 The configuration of the evaporator

温度测量采用 T 型热电偶,其误差为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,各测点布置位置如图 1 所示。热电偶 TC 1~TC 4 贴在加热器表面的十字槽内,测量蒸发器壁面温度;TC 5 测量蒸发器出口温度;TC 7 和 TC 8 分别测量冷凝器的进口和出口温度;TC 10 测量蒸发器进口温度;TC 11 测量补偿腔温度;TC 6 和 TC 9 分别测量蒸气管路和液体管路的中间温度。冷凝器和冷凝管道用绝热材料包裹。实验中由 3 根 90 W 的加热棒安装在直径为 36 mm 的紫铜块上作为模拟热源,通过调节电压来改变加热棒的功率,实现不同热负荷的模拟。热源外层包裹 10 mm 厚导热系数为 $0.012\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的纳米绝热材料,外层并用锡箔纸包裹,减少热损失。实验测试表明,热损失误差低于 0.5%。

工质充灌率定义为 $\alpha = V_i/V_{\text{total}}$, V_i 为充灌量,即充入工质的体积; V_{total} 为整个 LHP 的空腔体积,包括蒸发器、补偿腔、毛细芯空隙、冷凝器、蒸气管路和液体管路。过低和过高的充灌率对 LHP 稳定运行都有很大的影响^[7],本实验中氨工质的充灌率设定为 65%。蒸发器和冷凝器放置在同一水平位置,无任何重力辅助倾角。实验设定 60°C 为最高蒸发器壁

面温度,测试 LHP 的传热性能。实验中,环境温度在 18°C 左右。

2 实验结果和讨论

2.1 启动测试

启动特性是 LHP 的关键特性之一,是评定其可靠性和稳定性优劣的重要依据。图 3 为热负荷 120 W,冷凝温度 -15°C 时, LHP 的启动过程。当热负荷加载时,蒸发器壁面温度迅速上升。同时,蒸发器出口和冷凝器进口温度随之迅速上升。这意味着工质受热后迅速汽化,并且很快通过蒸气管道进入到冷凝器。当毛细芯内气液弯月面形成的毛细力大于系统循环阻力时,工质开始循环。液体回流到补偿腔内,蒸发器进口温度降低。补偿腔的温度受回流液过冷量、蒸发器向补偿腔的漏热以及与环境换热的控制,达到某一稳定值,则蒸发器壁面温度也趋于稳定。最后,毛细力等于系统阻力降压。

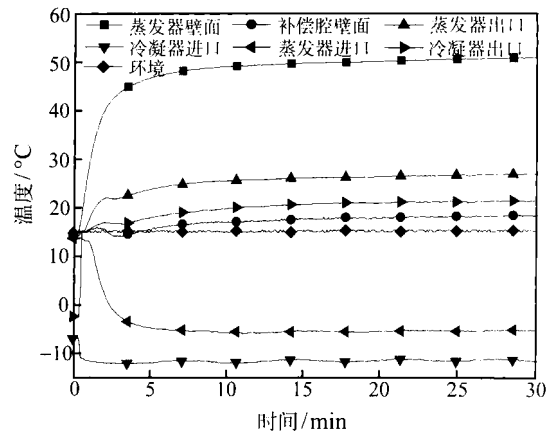


图 3 $Q = 120\text{ W}$, $T_{\text{sink}} = -15^{\circ}\text{C}$ 时, LHP 启动过程
Fig. 3 Start-up process of LHP with a heat load of 120 W at the heat sink temperature of -15°C

从图 3 可以看出, LHP 启动迅速,整个启动过程约为 4 min。并且,整个启动过程平稳,没有出现明显温度波动现象。由于平板式蒸发器结构的限制,毛细芯厚度比较薄,侧壁导热和背向导热效应比较严重,补偿腔内液体容易汽化,从而导致 LHP 系统出现温度波动甚至失稳。实验测试表明,在整个测试热负荷 2.5~130 W 范围内, LHP 启动过程中没有出现明显温度波动现象。

图 4 是 LHP 系统上从蒸发器壁面到补偿腔壁面沿程测点的温度分布。由于蒸发器壁面与蒸气之间存在热阻,蒸发器壁面温度 (TC 1~TC 4) 高于蒸气温度 (TC 5)。蒸气进入到蒸气管道,由于蒸气管道未包裹绝热材料,蒸气是否释放热量取决于其

温度是否高于环境温度。当热负荷为 10 W 时, 蒸气温度低于环境温度, 蒸气吸收热量, 故蒸气温度沿着蒸气管道有所上升。而当热负荷高于 10 W 时, 蒸气温度高于环境温度, 蒸气释放热量, 故蒸气温度沿着蒸气管道下降。在冷凝器内, 蒸气全部冷凝为液体并过冷。当回流液进入液体管道, 其温度低于环境温度, 吸收热量。沿着管路方向, 回流液温度升高。增大热负荷, 回流液流动速率增大, 其在液体管道停留的时间减短, 环境对其加热效应减弱。故随着热负荷的增加, 回流液沿着液体管道的温升降低。补偿腔的温度是受回流液过冷量、蒸发器向补偿腔的漏热量以及与环境换热量三者控制。

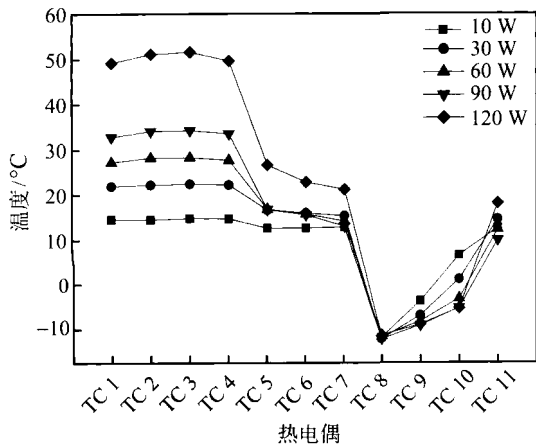


图 4 LHP 沿程测点温度分布 ($T_{\text{sink}} = -15^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 Temperature distributions along LHP at the heat sink temperature of -15°C

2.2 运行特性

图 5 是 LHP 各测点温度随热负荷变化的运行特性曲线。所有温度都是在 LHP 运行达到稳态后测定的。从图 5 可以看出, 当蒸发器壁面温度不超过 60°C 时, LHP 传递的最大热负荷达到 130 W, 热流密度 $12.8 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。

根据 LHP 运行温度曲线, 一般可划分为两个区域: 可变热导区和固定热导区 [8]。当热负荷低于 90 W 时, LHP 工作在可变热导区。补偿腔温度主要是由回流液过冷量和蒸发器向补偿腔的漏热量决定的 (忽略其和环境换热)。在可变热导区, 回流液过冷量的增量基本上补偿蒸发器向补偿腔漏热的增量, 补偿腔温度不随着热负荷增大而改变。同时, 补偿腔内未充满液体。随着热负荷增加, 冷凝器内两相区增加, 液体工质向补偿腔移动。当补偿腔内完全充满液体时, LHP 工作在固定热导区, LHP 运行温度随着热负荷的增加而增大。

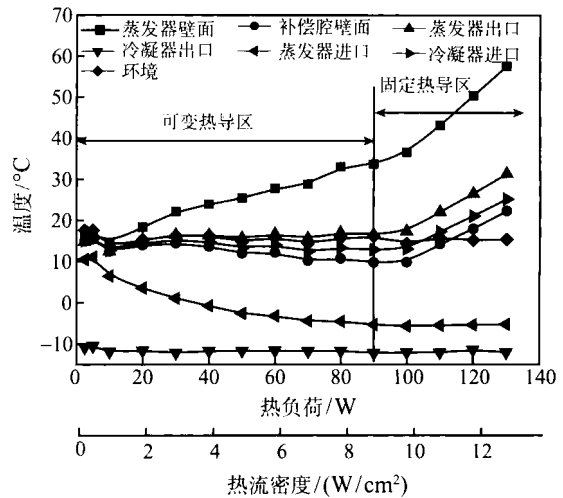


图 5 LHP 的运行特性 ($T_{\text{sink}} = -15^{\circ}\text{C}$)

Fig. 5 The operating characteristic of LHP at the heat sink temperature of -15°C

2.3 变热负荷测试

变热负荷特性是评价 LHP 可靠性和稳定性的另一个重要特性。为模拟实际应用中热负荷经常改变的工况, 本实验以某一热负荷启动, 当 LHP 达到稳态后随机地改变热负荷大小, 验证该系统在变热负荷工况下的响应特性。图 6 是 LHP 变热负荷工况下的运行情况。从图 6 可以看出, LHP 在热负荷 10~130 W 范围内, 能够稳定地运行。当热负荷改变时, 蒸发器温度在 2~7 min 内迅速地改变并很快稳定下来, 具有良好的响应能力。随着热负荷增加, 工质汽化量增加。系统流动阻力增大, 毛细芯内气液弯月面自调节, 蒸气侧压力升高, 则蒸发器壁面温度随之升高。反之, 随着热负荷的减小, 蒸发器壁面温度降低。无论热负荷怎样改变, LHP 都能进行自我调节, 适应热负荷的变化, 证明其具有一定的抗击热负荷改变的能力。

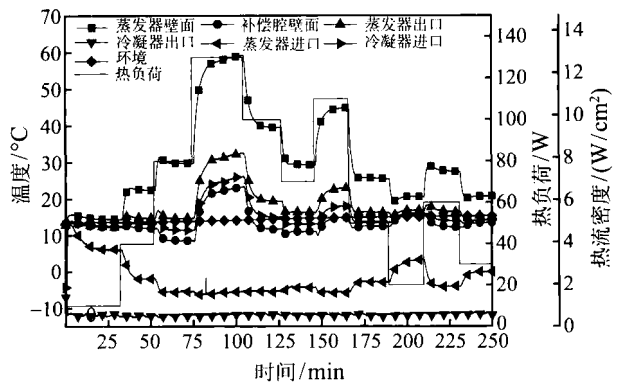


图 6 $T_{\text{sink}} = -15^{\circ}\text{C}$, LHP 变热负荷工况运行

Fig. 6 The operating test of LHP with variable heat loads at the heat sink temperature of -15°C

2.4 热阻

根据 LHP 的原理, LHP 整体热阻定义为:

$$R_{LHP} = (T_{\text{evap}} - T_{\text{cond}})/Q \quad (1)$$

其中, Q 为热负荷; T_{evap} 是蒸发器壁面的平均温度; T_{cond} 是冷凝器平均温度, 包括冷凝器的进口温度和出口温度。

图 7 是 LHP 的热阻随热负荷的关系。从图 7 看出, LHP 热阻变化的整体趋势是随着热负荷的增加而减小。但是当热负荷高于 100 W 时, LHP 热阻随着热负荷的增加略有上升, 如图 7 中 A 区域所示。其主要原因是当热负荷大于 100 W 时, 毛细芯内部和背面形成气泡, 阻塞液体流动, 毛细芯输运性变差。蒸发器内换热性能降低, 使得整体热阻增大。当热负荷在 2.5~130 W 区域时, LHP 热阻在 0.36~5.5 °C/W 改变。当热负荷为 100 W 时, LHP 热阻达到最小 0.36 °C/W。

热沉冷凝温度升高, 可以降低蒸发器与热沉之间的温差。故冷凝温度的升高, LHP 热阻降低。冷凝温度 0°C 时的 LHP 热阻低于冷凝温度 -15°C 时的热阻。

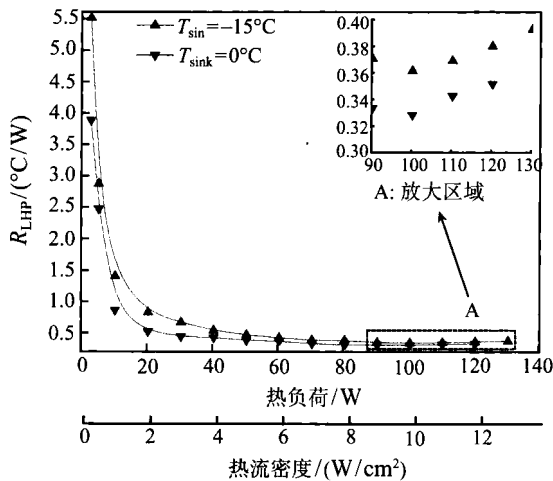


图 7 LHP 热阻

Fig. 7 The total thermal resistance of LHP

3 结 论

本文设计一套平板式不锈钢-氨环路热管, 采用双孔径毛细芯, 研究其传热性能。得出结论如下:

1) LHP 最低能够在最低热负荷 2.5 W 启动运行。当蒸发器壁面温度低于 60°C 时, LHP 能够传递的最大热负荷达到 130 W, 热流密度 12.8 W/cm²。

2) LHP 启动迅速, 在热负荷 2.5~130 W 区间内运行稳定, 未发生明显的温度波动。

3) 在热负荷 10~130 W 区域内, LHP 能够变热负荷运行, 具有较强的自调节能力。

4) LHP 热阻整体上随着热负荷的增加而减小。但是当热负荷高于 100 W 时, LHP 热阻随着热负荷的增加略有上升。

参 考 文 献

- [1] Maidanik Y F, Vershinin S V, Chernysheva M A. Development and Tests of Miniature Loop Heat Pipe With a Flat Evaporator [C]// 30th International Conference on Environmental Systems. Toulouse: France, 2000, SAE Paper 2000-01-2491
- [2] LI Ji, WANG Daming, Peterson G P. Experimental Studies on a High Performance Compact Loop Heat Pipe With a Square Flat Evaporator [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30: 741-752
- [3] 周海迎. 平板式环路热管实验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006
ZHOU Haiying. The Experimental Investigation of LHP With a Flat Evaporator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006
- [4] Singh R, Akbarzadeh A, Mochizuki M. Operational Characteristics of a Miniature Loop Heat Pipe With Flat Evaporator [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47(11): 1504-1515
- [5] 李金旺, 邹勇, 程林. 环路热管毛细芯热物性实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 57-61
LI Jinwang, ZOU Yong, CHENG Lin. Experimental Study on Thermophysical Properties of Capillary Wicks for Loop Heat Pipe [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(17): 57-61
- [6] 盖东兴, 刘伟, 刘志春, 等. 平板型 mLHP 温度波动研究 [J]. 中国空间科学技术, 2009, 29(5): 15-19
GAI Dongxin, LIU Wei, LIU Zhichun, et al. Investigation of Temperature Oscillation in Miniature Loop Heat Pipe With Flat Evaporator [J]. Chinese Space Science and Technology, 2009, 29(5): 15-19
- [7] 陈彬彬, 刘志春, 刘伟, 等. 平板式 mLHP 实验的稳定性分析 [J]. 工程热物理论, 2011, 32(4): 675-678
CHEN Binbin, LIU Zhichun, LIU Wei, et al. Analysis on Stability of Miniature Loop Heat Pipe With Flat Evaporator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(4): 675-678
- [8] Launay S, Sartre V, Bonjour J. Analytical Model for Characterization of Loop Heat Pipes [J]. Journal of Thermophysics of Heat Transfer, 2008, 22(4): 623-631